模拟干旱胁迫对巴东木莲种子萌发和芽苗生长的影响

王毅敏[1,2],黄婷[1]，陈发菊[1]，梁宏伟[1],王玉兵[1*]

(1. 三峡区域植物遗传与种质创新重点实验室/三峡大学生物技术研究中心，湖北 宜昌 443000；

2. 三峡植物园管理处，湖北 宜昌 443111)

摘要：巴东木莲原生种群天然更新差，林下鲜见更新幼苗或幼树，为探究其种子萌发和芽苗在生长期对干旱胁迫的耐受性，该文以巴东木莲种子为材料，采用不同质量浓度的聚乙二醇（PEG-6000）模拟干旱胁迫，分析干旱胁迫对其种子萌发、芽苗生长及其相关的生理生化指标的影响。结果表明：不同质量浓度的PEG溶液对巴东木莲种子萌发和芽苗生长产生显著影响（P＜0.05），萌发率和存活率随PEG质量浓度的增加而逐渐降低，当PEG质量浓度≥301 g·L^{-1}时，种子萌发受到抑制；且萌发时间也明显推迟。随着干旱胁迫程度的增加，巴东木莲芽苗叶绿素含量逐渐降低；可溶性蛋白含量和超氧化物歧化酶(SOD)活性表现出不同程度的先升高后降低趋势；而脯氨酸(Pro)和丙二醛（MDA）含量及过氧化物酶（POD）和抗坏血酸过氧化氢酶（APX）活性呈现逐渐升高的趋势。综上分析，巴东木莲种子萌发及芽苗的生长对水分需求明显，虽可通过渗透调节和提高保护性酶活性来适应一定程度的干旱胁迫，但在繁育过程中，需防止干旱损伤。研究结果可为巴东木莲种子繁育更新提供理论依据，有助于巴东木莲种群扩大。

关键词：巴东木莲，干旱胁迫，种子萌发，芽苗生长，芽苗生理

中图分类号：Q945　　　　**文献标识码：**A

Effects of simulated drought stress on seed germination and seedling growth of *Manglietia patungensis*

WANG Yimin[1,2], HUANG Ting[1] , CHEN Fajü[1] , LIANG Hongwei[1] , WANG Yubing[1*]

(1. *Key Laboratory of Three Gorges Regional Plant Genetics & Germplasm Enhancement (CTGU)*/*Biotechnology Research Center*（*CTGU*）, *China Three Gorges University*, Yichang 443002, Hubei, China; 2. *Management Office of Three Gorges Botanical Garden*, Yichang 443111, Hubei, China）

Abstract: The native communities of *Manglietia patungensis* are difficult to regenerate naturally, and seedlings or saplings are rarely found under the forest. To explore the tolerance of seed germination and the growth period of bud seedlings under drought stress, this study employs the seeds of *M. patungensis* with different mass concentrations of polyethylene glycol (PEG-6000) to analyze the effects of drought stress on seed germination, sprout growth and related physiological and biochemical indexes under different simulate drought treatments. The results showed that the concentration of PEG solution had a significant impact on seed germination and sprout growth of *M. patungensis* (P <0.05). The germination and survival rate gradually decreased with the increase of PEG mass concentration. When the PEG mass concentration was more than 301 g·L^{-1}, seed germination was inhibited, and the germination time was

基金项目：国家自然科学基金（31770654）；湖北省技术创新专项资助（2018ACA132）[Supported by the National Natural Science Foundation of China (31770654); Special Program for Technological Innovation of Hubei Province (2018ACA132)]。

作者简介：王毅敏（1986-），女，甘肃靖远人，硕士研究生，工程师，从事植物多样性保护与繁育研究，(E-mail)yiminwangzw@foxmail.com。

*__通信作者：__王玉兵，湖北恩施人，博士，副教授，从事植物多样性保护研究,(E-mail)tomswfc1977@163.com。

significantly delayed. The chlorophyll content of *M. patungensis* buds decreased gradually with the increase of the degree of drought stress; the content of soluble protein and the activity of SOD enzyme increased and then decreased; while the content of proline, MDA and the activity of POD and APX enzyme increased. In summary, the water demand for seed germination and bud growth of *M. patungensis* is obvious. Although it can adapt to a certain degree of drought stress through osmotic adjustment and increase protective enzyme activity, it is necessary to prevent drought damage in the breeding process. The research provides a theoretical basis for seed reproduction and regeneration of *M. patungensis*, and contribute to the population expansion.

Keywords: *Manglietia patungensis*, drought stress, seed germination, bud seedling growth, bud seedling physiology

种子萌发及幼苗生长阶段是植物生命历程的初始阶段，对其生命周期适应能力的构成具有深远的影响（Donohue et al.，2010）。种子在萌发及幼苗生长发展阶段没有完善的生存资源获取和利用的功能系统，因此大多数植物种子在萌发和幼苗生长阶段容易失活（James et al.，2011；Larson et al.，2015）。水作为种子萌发的必要条件之一，对种子萌发与成苗具有重要的作用。研究表明，干旱胁迫会导致种子代谢紊乱，降低植物根系活性、可溶性糖含量和呼吸作用，致使种子萌发所需能量产生不足，对种子的萌发和幼苗的早期存活产生特殊的影响（Doupis et al.，2011）。在干旱胁迫下，种子发芽率和发芽势均会显著降低（吴漫玲等，2019；何润华等，2019），持续的干旱胁迫会显著抑制幼苗的生长（彭亮等，2018），引起幼苗失水，诱发渗透胁迫及活性氧损伤。但部分植物可通过降低细胞液渗透势、改变酶促保护系统中酶的合成等生长策略和生理适应性来抵御干旱。聚乙二醇（PEG）是一种理想的模拟干旱环境的高分子有机化合物，广泛应用于种子和幼苗与渗透及干旱胁迫等相关的试验（Muscolo & Iglesias，2014）。

巴东木莲（*Manglietia patungensis*）为木兰科木莲属（*Manglietia*）常绿乔木，零散分布于湖北、重庆、湖南等地，因分布范围狭窄，种群数量稀少，而处于濒危状态（IUCN, 2015）。巴东木莲作为木莲属分布最北的种，不仅在木兰科植物系统发育与演化上具有重要研究价值，还具有较高的观赏价值和药用价值（葛刚等，2009；李晓东等，2004）。巴东木莲原生种群的天然林下幼苗及幼树少见，土壤湿度可能是影响其种子萌发的主要因子（李晓东等，2006）。现有的巴东木莲种子生物学研究表明，在人工条件下，巴东木莲种子最佳萌发温度为 20～30 ℃，萌发率可达 100%，但在自然条件下其种子萌发率极低，水分可能是重要的影响因子之一（陈发菊等，2007；陈芳清等，2012）。因此开展巴东木莲种子萌发及芽苗生长对干旱胁迫的耐受性研究，对巴东木莲的种群恢复具有十分重要的意义。本研究拟通过人工模拟干旱胁迫的方法对巴东木莲种子萌发及芽苗生长进行研究，揭示巴东木莲种子萌发和芽苗生长与土壤水分的相关性，其结果可为巴东木莲的种苗繁育和种群更新提供科学依据。

1 材料和方法

1.1 实验材料

试验用巴东木莲种子于 2016 年 10 月 5 日采自湖南省小溪国家级自然保护区，除去外种皮后 4 ℃低温沙藏，次年 3 月于三峡大学生物技术研究中心开展 PEG 模拟干旱胁迫实验。

1.2 实验设计

以蒸馏水为对照（CK），配置质量浓度分别为 95、140、170、221、250、301 和 345 g·L^{-1} 等 7 个梯度的 PEG-6000 溶液备用（麦苗苗等，2009）。在培养皿中垫 2 层滤纸作为发芽床，并用不同质量浓度 PEG-6000 溶液润湿芽床，然后将灭菌好的巴东木莲种子均匀排放于发芽床中，每皿 30 粒，重复 4 次。将培养皿置于温度 25 ℃，遮光条件下培养 25 d 后置于光下培养（光照 2 000 lx，16 h/d）。

1.3 指标及测定方法

1.3.1 种子萌发和生长指标测定

以胚根突破种皮代表萌发，每 3 d 对萌发种子数和芽苗生长状况进行记录，在 5 d 内无种子发芽视为发芽结束，计算萌发率；用直尺测定每个发芽种子的胚轴和胚根长度；在第 55 d 统计存活率。萌发率=种子萌发数/供试种子数×100 %；存活率=存活芽苗数/芽苗总数×100 %。

1. 3. 2 芽苗生理指标测定

分别取各处理组培养 55 d 芽苗的子叶及真叶 10 g，液氮处理后置于-80 ℃冰箱备用。可溶性蛋白含量的测定采用考马斯亮蓝法（曲春香等，2006），脯氨酸(Pro)含量测定采用茚三酮显色法（张殿霆等，1990；李邵军等，2005），丙二醛（MDA）含量的测定采用 TBA 法（王妍等，2013），叶绿素的测定采用紫外分光光度法（李合生，2006），超氧化物歧化酶（SOD）的测定采用 NBT 还原法（李合生，2006），过氧化物酶（POD）的测定采用愈创木酚显色法（郑世英等，2010），抗坏血酸过氧化氢酶（APX）采用紫外分光光度法（宋新华等，2011）。

1.4 数据分析

采用 Excel 进行数据处理和图表制作，SPSS21.0 软件方差分析，显著性 P<0.05。

2 结果和分析

2. 1 干旱胁迫对种子萌发过程的影响

种子萌发结果(图 1)显示，对照组的巴东木莲种子发芽启动时间为 10 d，其余各处理的发芽启动时间随 PEG 浓度的升高逐渐延迟，PEG 质量浓度为 95、140、170、221 和 250 g·L^{-1} 处理的发芽启动时间分别为 15、20、20、28 和 40 d；当 PEG 质量浓度大于 301 g·L^{-1}，巴东木莲的种子不萌发。表明低质量浓度的 PEG 胁迫对巴东木莲种子萌发具有延缓作用，且随着干旱胁迫程度的加强，发芽启动时间显著滞后。

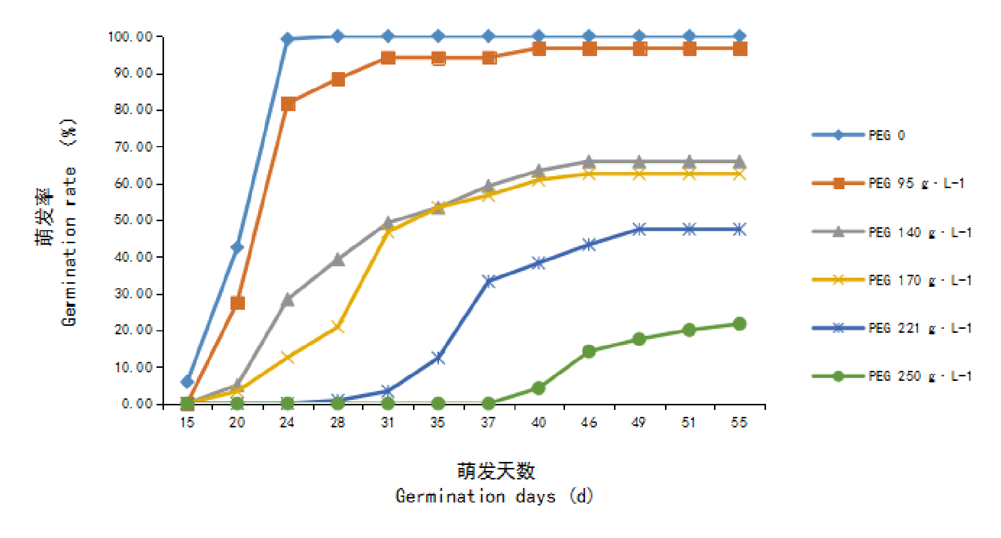


图 1 各处理萌发率随萌发天数的变化

Fig. 1 Germination rate of each experimental group varied with the number of germination days

从表 1 可以看出，随 PEG 质量浓度的升高，巴东木莲种子萌发率和存活率均呈现明显降低的趋势，且各处理间差异显著（P<0.05）。在 PEG 质量浓度 250 g·L^{-1} 时，其萌发率和存活率仅为对照组的 21.67%和 17.50%，高质量浓度的 PEG 抑制了巴东木莲种子的萌发。表明干旱胁迫对巴东木莲种子萌发具有明显的抑制作用。当 PEG 浓度≤250 g·L^{-1} 时，虽然巴东木莲种子萌发率呈下降的趋势，但均有一定数量的种子可萌发和生长，表明巴东木莲的种子具有一定抗旱能力。

表 1 PEG 处理对巴东木莲种子萌发和芽苗生长的影响

Table 1 Effects of PEG treatment on seed germination and seedling growth of *Manglietia patungensis*

PEG 质量浓度 PEG mass concentration ($g \cdot L^{-1}$)	萌发率 Germinnation rate （%）	存活率 Survival rate （%）	胚轴长 Hypocoty length (cm)	胚根长 Radicle length (cm)
0（CK）	100.00 ±0.00 a	100.00 ±0.00 a	6.88 ±0.05 a	5.44 ±0.11 a
95	96.67 ±0.00 b	96.67 ±0.00 b	5.81 ±0.19 b	4.95 ±0.08 b
140	65.84 ±0.84 c	65.00 ±0.96 c	2.96 ±0.08 c	3.85 ±0.02 c
170	62.50 ±0.83 d	60.00 ±1.36 d	1.15 ±0.07 d	3.38 ±0.12 d
221	47.50 ±1.60 e	44.17 ±0.84 e	0.33 ±0.07 e	1.12 ±0.04 e
250	21.67 ±0.96 f	17.50 ±0.83 f	0.14 ±0.01 f	0.65 ±0.06 f

注：表中数据为平均值±标准误差。不同小写字母表示显著差异（P＜0.05）。

Note: Data in the table are mean ±standard error, Different lowercase letters indicate significant differences(P<0.05).

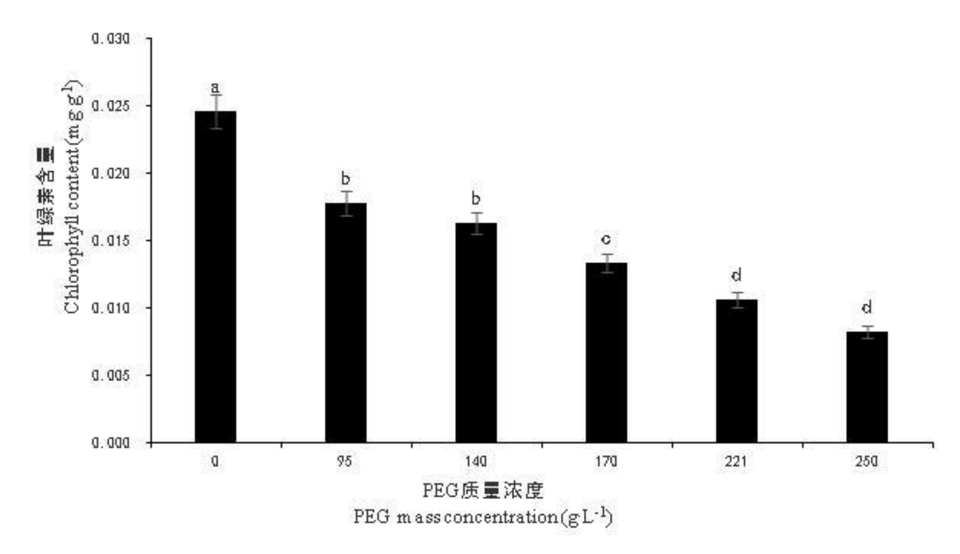
巴东木莲芽苗胚根和胚轴的长度随 PEG 胁迫程度的升高而呈下降的趋势，对照组长势最好，其胚轴和胚根平均长度分别为 6.88 cm 和 5.44 ㎝，当 PEG 质量浓度为 250 $g \cdot L^{-1}$ 时，其胚轴和胚根平均长度分别为 0.14 cm 和 0.65 cm，且各个处理下的胚根和胚轴长度均有显著差异（P<0.05）。随着干旱胁迫的加重，部分芽苗的根尖具有黑化现象，甚至出现烂根及死亡的现象。表明干旱胁迫会抑制巴东木莲芽苗的生长，且浓度越大，抑制作用越大。

2.2 干旱胁迫对芽苗生理指标的影响

当 PEG 质量浓度为 301 $g \cdot L^{-1}$ 和 345 $g \cdot L^{-1}$ 时，巴东木莲种子始终没有萌发，故没有对这两组处理进行生理指标测定。

2. 2. 1 对叶绿素含量的影响

随 PEG 质量浓度的升高，巴东木莲芽苗叶绿素含量逐渐减少（图 2），对照组的叶绿体含量最高，达 0.026 $mg.g^{-1}$，PEG 质量浓度为 250 $g \cdot L^{-1}$ 处理组叶绿体含量最低，仅为对照组的 27%。对照组与其处理组的叶绿素含量均有显著差异，95 $g \cdot L^{-1}$ 处理与 140 $g \cdot L^{-1}$ 处理的叶绿素含量无显著差异，221 $g \cdot L^{-1}$ 与 250 $g \cdot L^{-1}$ 处理下的叶绿素含量无显著差异，170 $g \cdot L^{-1}$ 与 221、250 $g \cdot L^{-1}$ 处理下叶绿素含量均差异显著（P<0.05）。上述结果表明，干旱胁迫会影响巴东木莲芽苗叶绿素的产生，随 PEG 质量浓度的增加，叶绿素含量逐渐减少，影响正常的光合作用，对巴东木莲芽苗的正常生长产生影响。



不同小写字母表示该因素的显著性（P<0.05）。下同

Different lowercase letters indicate significant differences (P<0.05). The same below.

图 2 各实验组叶绿素含量

Fig. 2 Chlorophyll content in each experimental group

2.2.2 对渗透调节的影响

随着干旱胁迫的加剧，可溶性蛋白含量先升高后下降（图 3：A），当 PEG 质量浓度为 0～221 g·L^{-1}时，可溶性蛋白含量逐渐升高，最大值为 3.93 mg g^{-1}，PEG 质量浓度为 250 g·L^{-1}时，可溶性蛋白含量逐渐下降。对照组的可溶性蛋白含量为 1.00 mg g^{-1}，处于最低水平。所有处理中除 170 g·L^{-1}与 250 g·L^{-1}处理差异不显著外，其他各处理均具有显著差异（P<0.05）。随着 PEG 质量浓度的增加，巴东木莲芽苗中脯氨酸（Pro）含量逐渐升高（图 3：B），当 PEG 质量浓度≤95 g·L^{-1}时，巴东木莲芽苗中 Pro 的含量较低；当 PEG 质量浓度为 140、170、221 g·L^{-1}时，Pro 含量缓慢升高，且均高于对照组；当 PEG 质量浓度为 250 g·L^{-1}时 Pro 含量达到最高值 0.19 μmol·g^{-1}，约为对照组的 3.3 倍。250 g·L^{-1}处理与其它各组差异显著（P<0.05），其它各处理之间差异均不显著。可见随着干旱胁迫程度的增加，巴东木莲芽苗可通过增加可溶性蛋白含量，积累脯氨酸进行渗透调节，以提升细胞的持水力，从而降低干旱胁迫带来的伤害。

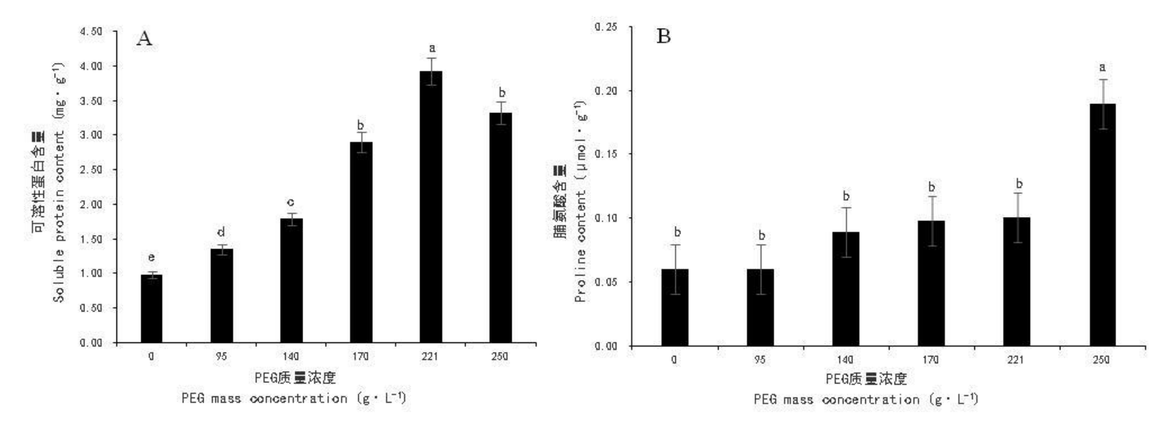


图 3 不同程度干旱胁迫组对渗透调节的影响

Fig.3 Effects of different levels of drought stress on osmotic adjustment

2.2.3 对芽苗细胞质膜的影响

在不同质量浓度 PEG 的胁迫下，丙二醛（MDA）含量与 PEG 质量浓度呈正相关，且随 PEG 质量浓度的升高，MDA 含量逐渐增加（图 4）。当 PEG 质量浓度≤95 g·L^{-1}时，MDA 的含量增加缓慢，且与对照组无显著差异；当 PEG 质量浓度为 140～221 g·L^{-1}时，MDA 的含量会逐渐增高，各处理之间也无显著差异；当 PEG 质量浓度为 250 g·L^{-1}时，MDA 含量为 0.37 μg·g^{-1}，约为对照组的 2.2 倍，明显升高，且该处理与其他处理差异显著（P<0.05）。表明巴东木莲芽苗可以抵抗一定程度因干旱胁迫引起的膜脂过氧化作用的伤害，但干旱胁迫程度过高仍会导致巴东木莲芽苗质膜受到严重破坏，从而影响其正常生长。

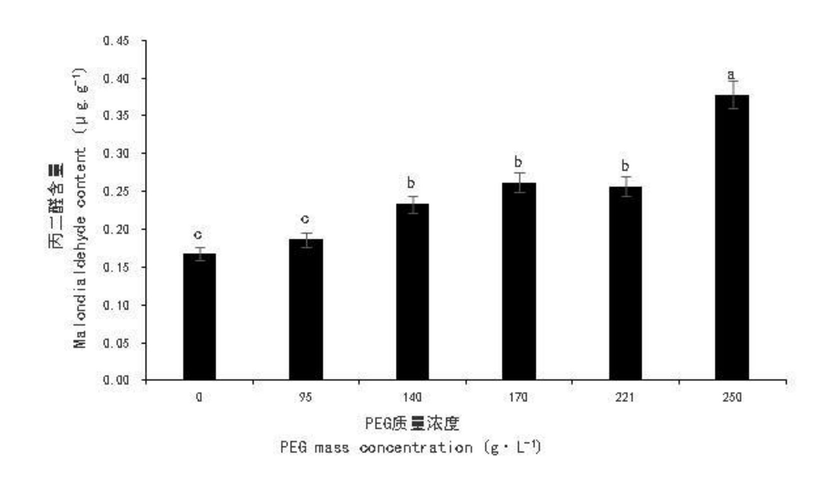


图 4 不同程度干旱胁迫组丙二醛含量

Fig. 4 MDA content in different levels of drought stress

2.2.4 对保护性酶活性的影响

随着 PEG 胁迫处理的加强，巴东木莲芽苗内超氧化物歧化酶（SOD）活性先升高后降低（图 5：A），当 PEG 质量浓度为 95 g L^{-1} 时，SOD 活性急剧增强，并达到最高值 0.34 U g^{-1}，随着干旱胁迫的加剧，SOD 活性开始下降，95 g L^{-1} 和 140 g L^{-1} 处理无显著差异，170g L^{-1} 和 221 g L^{-1} 处理无显著差异；250 g L^{-1} 处理组 SOD 活性低于对照组，且与对照组无显著差异，与其他各处理组差异显著（P<0.05）。随着 PEG 质量浓度的不断升高，过氧化物酶（POD）的活性，整体呈现逐渐上升的趋势（图 5：B），最初表现较为平缓，当 PEG 质量浓度为 250 g L^{-1} 时，POD 含量快速增加，达到 2.48 U g^{-1}，且与其他各组比较均有极显著差异（P<0.05）。对照组的 POD 含量为 0.81 U g^{-1} 最低，与 95 g L^{-1} 处理之间无显著差异，与 140 g L^{-1}、170 g L^{-1} 和 221 g L^{-1} 处理差异显著（P<0.05）。随着 PEG 质量浓度的逐渐增大，抗坏血酸过氧化氢酶（APX）活性逐渐上升（图 5：C），所有处理 APX 含量均高于对照组。除 140 g L^{-1} 和 170 g L^{-1} 处理之间无显著差异外，其它各处理间均差异显著（P<0.05）。可见，在低质量浓度 PEG 处理时，巴东木莲芽苗通过 SOD 活性的升高来适应胁迫，随干旱胁迫加强 SOD 活性受到抑制，POD 和 APX 活性提高，且活性保持较高水平，保护性酶清除由于胁迫引起的活性氧，以此抵御干旱胁迫造成的伤害。

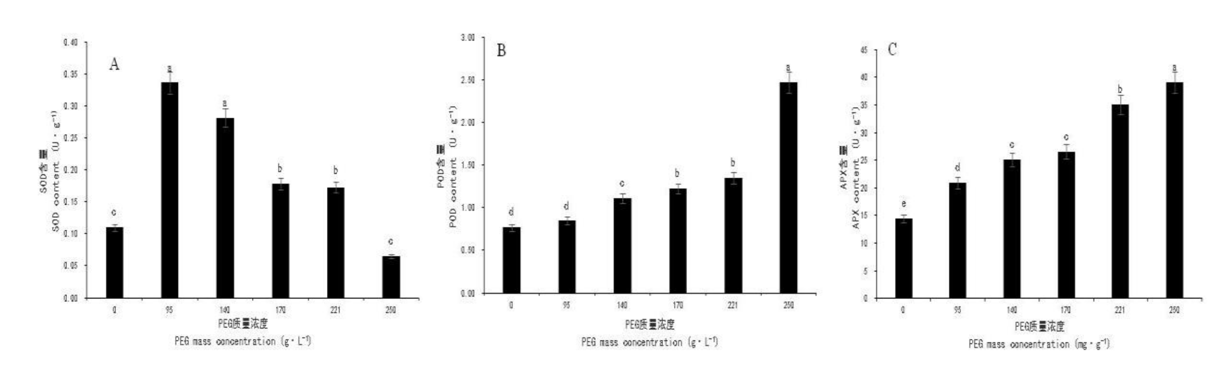


图 5 不同程度干旱胁迫下保护性酶活性变化

Fig. 5 Changes in protective enzyme activity under different levels of drought stress

3 讨论与结论

干旱胁迫不仅会影响种子活力，还会对种子萌发时间和萌发率等产生影响。在模拟干旱胁迫条件下，当 140 g L^{-1}<PEG≤250 g L^{-1} 时巴东木莲种子萌发及芽苗生长的不适反应就有所表现，其萌发率随 PEG 浓度的升高而下降，且当 PEG 浓度＞250 g L^{-1} 时，种子失去活性，不能萌发。该研究结果与梓树（*Catalpa ovata*）种子萌发和幼苗生长规律一致（何润华等，2019）。实验发现，随着胁迫程度的加重，不仅巴东木莲种子的萌发率降低，其萌发时间也显著推迟，表明巴东木莲对干旱有一定的适应能力，是巴东木莲在长期进化过程中形成的与生存环境相适应的萌发对策。这也从另一层面反映出巴东木莲可通过自身调节萌发行为，将干旱胁迫带来的风险分散，从而有利于种群的延续。也有研究表明，低浓度的 PEG 对木本植物如栓皮栎（*Quercus variabilis*）（李志萍等，2013）、水杉（*Metasequoia glyptostroboides*）（吴漫玲等，2019）等种子萌发有一定的促进作用，其原因可能与植物本身的生物学特性有关。

叶绿素是植物进行光合作用的物质基础，其含量可作为评价干旱环境下植物耐受性的重要指标之一（桑子阳等，2011）。植物在干旱胁迫条件下通过抑制叶绿素合成，加速叶绿体分解，导致叶绿素含量显著下降（马晓华等，2018）。该研究也得出相似的结论，巴东木莲芽苗叶绿素含量随着 PEG 浓度增高而显著下降，说明巴东木莲芽苗在高质量浓度 PEG 胁迫下，光合作用受到

严重影响。

在植物遭受干旱胁迫时可通过积累一些可溶性糖、脯氨酸等渗透调节物来发挥生理保护作用，以增强植物耐受干旱胁迫的能力（Azmat & Moin，2019；Muscolo & Iglesias，2014）。在该研究中，巴东木莲芽苗中可溶性蛋白和游离脯氨酸的含量随 PEG 浓度的升高而增加，表明在干旱胁迫下，巴东木莲芽苗可通过积累较多的渗透调节物质来维持细胞水势和膨压，从而减少胁迫所造成的伤害，该结果与很多植物种子萌发时对干旱胁迫响应的研究结果一致（王继玥等，2018；王满莲等，2014）。但研究结果略有不同的是，当 PEG 浓度≥250 g·L^{-1}时，巴东木莲芽苗中可溶性蛋白含量开始下降，分析其原因可能是在高浓度的 PEG 胁迫下，巴东木莲体内的蛋白合成酶钝化，蛋白质分解速度大于蛋白合成的速度，导致可溶性蛋白含量下降。

MDA 常被作为植物细胞膜损伤程度的指示物，其含量可以反映植物遭受逆境伤害的程度，研究表明：当 MDA 含量大量增加时，植物体内细胞受到较严重的破坏（罗青红等，2017）。该研究中随PEG质量浓度的增加，巴东木莲芽苗中MDA含量呈现增加趋势，当PEG浓度在0～221 g·L^{-1}之间时，MDA 的增加缓慢，但当 PEG 浓度为 250 g·L^{-1}时，MDA 含量急剧增加，说明此时的胁迫已对巴东木莲芽苗细胞质膜造成严重伤害，这与麦苗苗等(2009)对连香树(*Cercidiphyllum japonicum*)芽苗生长的研究结果一致。

植物在长期进化过程中可通过形成 SOD、POD、APX 等保护性酶类来抵御活性氧带来的伤害（李志萍等，2013；郑清岭等，2018）。该研究发现巴东木莲芽苗在低 PEG 质量浓度胁迫时，SOD 含量表现出先增后显著下降的趋势，而 POD 和 APX 的含量一直处于上升的趋势，表明巴东木莲在受到轻度胁迫时可通过提高 SOD、POD、APX 等酶的活性来消除活性氧的伤害，当 PEG 浓度≤95 g·L^{-1}时，主要由 SOD 清除氧自由基，防止其对细胞膜系统伤害。随着 PEG 质量浓度的增大，SOD 活性减弱，POD 和 APX 活性逐渐升高。当 PEG 质量浓度在 95～250 g·L^{-1}时，POD 催化 H_2O_2 降解，APX 参与抗坏血酸-谷胱甘肽循环，可清除叶绿体、细胞质和微体中的 H_2O_2，以此减缓干旱胁迫对巴东木莲芽苗的伤害。而当巴东木莲受到PEG质量浓度≥250 g·L^{-1}的重度胁迫时，虽然 POD 和 APX 的含量升高，但有害物质的积累超过了保护酶的清除能力，致使巴东木莲芽苗受到一定程度的伤害。这一研究与红花玉兰(*Magnolia wufengensis*)(桑子阳等，2011)、远志（*Polygala tenuifolia*）（彭亮等，2018）等物种通过提高抗氧化酶活性，清除活性氧，来抵御干旱胁迫的研究结果相似，但并不能完全消除干旱胁迫带来的影响。

综上所述，巴东木莲种子萌发和芽苗生长对水分需求明显，中度干旱胁迫（PEG 质量浓度为 95～221 g·L^{-1}）时，巴东木莲可通过自身的渗透调节和保护性酶活来适应干旱胁迫，并把干旱胁迫带来的损伤降到最低，当重度干旱胁迫（PEG 质量浓度≥250 g·L^{-1}）时，会对巴东木莲芽苗带来极大损害。因此在巴东木莲的播种育苗过程中，充分考虑水分因素，这对于提高巴东木莲种子发芽率、增加幼苗和幼树数量有帮助。但本研究结果是在一定实验条件下得出，有一定的局限性，巴东木莲原生种群的天然更新困难的障碍因素需要更进一步的探究。

参考文献

AZMAT R, MOIN S, 2019. The remediation of drought stress under VAM inoculation through proline chemical transformation action[J]. J Photochem Photobiol B, 193:155-161.

CHEN FJ, LIANG HW, WANG X, et al., 2007. Seed dormancy and germination characteristics of *Manglietia patungensis*, an endangered plant endemic to China [J]. Biodivers Sci, 15(5): 492-499. [陈发菊, 梁宏伟, 王旭, 等, 2007. 濒危植物巴东木莲种子休眠与萌发特性的研究[J]. 生物多样性, 15(5):492-499.]

CHEN FQ, LIU L, CHEN FJ, et al., 2012. The ecological characteristics of seed germination and seedling establishment of *Manglietia patungensis*: implication for species conservation[J]. Am J Plant Sci, 3; 1455-1461

DONOHUE K, RAFAEL RDC, BURGHARDT L, et al., 2010. Germination, post-germination adaptation, and species ecological ranges[J]. Ann Rev Ecol Syst, 41(41): 293-319.

DOUPIS G, CHARTZOULAKIS K, BEIS A, et al., 2011. Allometric and biochemical responses of grapevines subjectedto drought and enhanced ultraviolet-B radiation[J]. Aust J Grape Wine Res, 17(1): 36-42.

HE RH, LI Y, XIAO Y, et al., 2019. Effect of simulated drought stress on seed germination and geographical variation of six provenances of *Catalpa ovata* [J]. Guihaia. http://kns.cnki.net/kcms/detail/45.1134.Q.20190801.1807.006.html. [何润华, 李媛, 肖遥, 等, 2019. 模拟干旱胁迫下 6 个种源梓树种子萌发特性及地理变异研究[J]. 广西植物, http://kns.cnki.net/kcms/detail/45.1134.Q.20190801.1807.006.html.]

IUCN Red List, 2015. *Magnolia patungensis*. The IUCN Red List of Threatened Species. Available at http://dx.doi.org/10.2305/IUCN.UK.2015-2.RLTS.T15115907A15115911.en.

JAMES JJ, SVEJCAR TJ, RINELLA MJ, 2011. Demographic processes limiting seedling recruitment in arid grassland restoration[J]. J Appl Ecol, 48(4): 961-969.

LARSON JE, SHELEY RL, HARDEGREE SP, et al. 2015. Seed and seedling traits affecting critical life stage transitions and recruitment outcomes in dryland grasses[J]. J Appl Ecol, 52(1): 199-209.

LI HS, 2006. Principles and techniques of plant physiology and biochemistry experiments [M]. Beijing: Higher Education Press. [李合生, 2006. 植物生理生化试验原理和技术[M]. 北京: 高等教育出版社.]

LI SJ, GONG YH, WANG JR, et al., 2005. Discussion on the reaction between proline and ninhydrin in the determination of proline content by ninhydrin method[J]. Plant Physiol Comm., 41(3): 365-368. [李绍军, 龚月桦, 王俊儒, 等, 2005. 关于茚三酮法测定脯氨酸含量中脯氨酸与茚三酮反应之探讨[J]. 植物生理学通讯, 41(3): 365-368.]

LI XD, HUANG HW, LI ZZ, et al., 2004. Distribution and conservation strategy of endangered distribution and conservation strategies of the endangered *Manglietia patungensis* Hu [J]. J Wuhan Bot Res, 22(5): 421-427. [李晓东, 黄宏文, 李作洲, 等. 2004. 濒危植物巴东木莲的分布及保护策略[J]. 武汉植物学研究, 22(5): 421-427.]

LI XD, HUANG HW, LI JQ, et al., 2006. Community structure of *Manglietia patungensis* in Xiaoxi Natural Reserve, Hunan Province [J]. J Wuhan Bot Res, 24(1): 31-37. [李晓东, 黄宏文, 李建强, 等. 2006. 湖南小溪自然保护区巴东木莲群落结构[J]. 武汉植物学研究, 24(1): 31-37.]

LI ZP, ZHANG WH, CUI YC, 2013. Effects of PEG simulated drught stress on seed germination and growth physiology of *Quercus variabili* [J]. Acta Bot Boreal-Occident Sin, 33(10): 2043-2049. [李志萍, 张文辉, 崔豫川, 2013. PEG模拟干旱胁迫对栓皮栎种子萌发及生长生理的影响[J]. 西北植物学报, 33(10): 2043-2049.]

LUO QH, NING HS, HE M, et al., 2017. Ecophysiological responses of five sandy shrubs to drought stress[J]. Sci Silvae Sinicae, 53(11): 29-42. [罗青红, 宁虎森, 何苗, 等, 2017. 5种沙地灌木对干旱胁迫的生理生态响应[J]. 林业科学, 53(11): 29-42.]

MA XH, ZHENG J, ZHANG XL, et al., 2018. The influence of drought stress on physiological and biochemical characteristics of *Lagerstroemia speciosa* and *Lagerstroemia balansae*[J]. J Southwest forest Univ (Nature Sci Ed), 38(5): 205-209. [马晓华, 郑坚, 张旭乐, 等, 2018. 干旱胁迫对大花紫薇与毛萼紫薇生理生化特征的影响[J]. 西南林业大学学报(自然科学), 38(5): 205-209.]

MAI MM, SHI DX, WANG ML, et al., 2009. Seed germination and seedling growth of *Cercidiphyllum japonicum* with PEG treatment[J]. Sci Silv Sin, 45(10): 94-99. [麦苗苗, 石大兴, 王米力, 等, 2009. PEG处理对连香树种子萌发与芽苗生长的影响[J]. 林业科学, 45(10): 94-99.]

MANTOVANI A, IGLESIAS RR, 2010. The effect of water stress on seed germination of three terrestrial bromeliads from restinga[J]. Braz J Bot, 33(1): 201-205.

MUSCOLO A, SIDARI M, ANASTASI U, et al., 2014. Effect of PEG-induced drought stress on seed germination of four lentil genotypes[J]. J Plant Interact, 9(1):354-363.

PENG L, YANG BY, ZHANG G, et al., 2018. Seed germination and seedling growth physiological characteristics of *Polygala tenuifolia* Willd. under drought stress[J]. Acta Bot Boreal-Occident Sin, 38(4): 741-749.[彭亮，杨冰月，张岗，等，2018. 干旱胁迫对远志种子萌发及幼苗生长和生理特性的影响[J]. 西北植物学报, 38(4): 741-749.]

QU CX, SHEN YD, WANG XF, et al., 2006. Study on the determination of soluble protein content in crude extracts of plants by Coomassie Brilliant Blue [J]. J Suzhou Univ (Nature Sci Ed), 22(2): 82-85. [曲春香，沈颂东，王雪峰，等, 2006. 用考马斯亮蓝测定植物粗提液中可溶性蛋白质含量方法的研究，苏州大学学报(自然科学版), 22(2): 82-85.]

SANG ZY, MA LY, CHEN FJ, et al., 2011. Growth and physiological characteristics of *Magnolia wufengensis* seedlings under drought stress[J]. Acta Bot Boreal-Occident Sin, 31(1): 109-115. [桑子阳，马履一，陈发菊，等，2011. 干旱胁迫对红花玉兰幼苗生长和生理特性的影响[J]. 西北植物学报, 31(1): 109-115.]

SHENG WB, XU LL, YE MB, et al., 1996. Study on determination of ASP activity[J]. Plant Phytophysiol Sin, (3): 203-205. [沈文飚，徐朗莱，叶茂炳，等，1996. 抗坏血酸过氧化物酶活性测定的探讨[J]. 植物生理学报, (3): 203-205.]

WANG JY, SHI DH, BAI Y, et al., 2018. Effect of drought stress with PEG-6000 on Seed germination and physiological properties in *Abelmoschus esculentus*[J]. J Trop Subtrop Bot, 26(6): 611-616. [王继玥，石登红，白禹，等，2018. PEG-6000模拟干旱胁迫对黄秋葵种子萌发和幼苗生理特性的影响[J]. 热带亚热带植物学报, 26(6): 611-616.]

WANG ML, WEI X, KONG DX, et al., 2014. Effects of drought stress and rehydration on physiological characteristics of *Ardisia corymbifera* var. *tuberifera* seedlings［J］. Guihaia, 34(1): 105-110.[王满莲，韦霄，孔德鑫，等, 2014. 干旱胁迫与复水对块根紫金牛生理特性的影响［J］. 广西植物, 34(1): 105-110.]

WANG Y, HU S, FU WC, et al., 2013. A new method for fast determination of total soluble sugars content in plant tissue: TBA-method[J]. J Jinggangshan Univ (Nature Sci Ed), 34(3): 37-40.[王妍，胡胜，付文成，等，2013. 一种快速测定可溶性糖的新方法-TBA法[J]. 井冈山大学学报(自然科学版), 34(3): 37-40.]

WU ML, ZHU J, AI XR, et al., 2019. Influences of simulating drought stress on seed germination of *Metasequoia glyptostroboides* under different temperature [J]. Guihaia. http://kns.cnki.net/kcms/detail/45.1134.Q.20190729.1413.002.html. [吴漫玲，朱江，艾训儒，等，2019. 不同温度条件下PEG模拟干旱胁迫对水杉种子萌发的影响[J]. 广西植物. http://kns.cnki.net/kcms/detail/45.1134.Q.20190729.1413.002.html.]

ZHANG DT, TING PH, ZHAO XY, et al., 1990. Determination of the content of free proline in wheat leaves [J]. Plant Physiol Comm, (4): 62-65. [张殿霆，廷沛洪，赵夕遗, 1990. 测定小麦叶片游离脯氨酸含量的方法[J]. 植物生理学通讯, (4): 62-65.]

ZHENG QL, YANG ZR, ZHANG FL, et al., 2018. Responses of reactive oxygen species scavenging system to drought stress in *Pugionium* Gaertn[J]. Acta Bot Boreal-Occident Sin,38(9): 1674-1682. [郑清岭，杨忠仁，张凤兰，等，2018. 沙芥属植物活性氧清除系统对干旱胁迫的响应[J]. 西北植物学报, 38(9): 1674-1682.]

ZHENG SY, SHANG XF, WANG JP, et al., 2010. Determination of antioxidant enzyme activity and

contents of MDA in maize seedlings under salt stress with visible spectrophotometry[J]. Biotechnol Bull, (7): 106-109. [郑世英，商学芳，王景平,等，2010. 可见分光光度法测定盐胁迫下玉米幼苗抗氧化酶活性及丙二醛含量[J]. 生物技术通报, (7): 106-109.]